

3

Metodologia para medição de vazão de gás em escoamento de gás úmido

Conforme discutido no capítulo 2, não há um consenso sobre a definição de gás úmido na comunidade internacional. Neste trabalho, será considerado que gás úmido refere-se a um gás contendo uma fração volumétrica de líquido (água e/ou condensado de gás natural) máxima correspondente a um número de Lockhart-Martinelli igual a 0,3.

Apesar do processamento primário que o gás natural sofre nas instalações de produção, conforme descrito no item 2.1, este tratamento, em muitos casos, não é suficiente para remover toda a água ou o condensado presentes no gás antes da realização do processo de medição de vazão deste gás, ou seja, a eficiência do processo de separação não é de 100%. Desta forma, frações de líquido são arrastadas juntamente com o gás natural, e o fluido não é medido em condições monofásicas.

Atualmente, existem no mercado medidores capazes de medir as vazões de gás natural e líquido (condensado e água) presentes em um escoamento multifásico. No entanto, esses medidores são extremamente caros e complexos, o que dificulta e, na maioria dos casos, inviabiliza a sua utilização nas instalações de produção. Além disso, há pouca experiência acumulada mundialmente com a utilização desses medidores de gás úmido (*Wet Gas Meters*).

Dessa forma, para a medição de vazão de gás em escoamento de gás úmido, são utilizados, em geral, medidores monofásicos de gás seco (principalmente a placa de orifício), especialmente quando a vazão de líquido não varie significativamente e possa ser determinada por outros métodos, como a técnica de traçadores químicos ou radioativos. Neste caso, o efeito da presença do líquido sobre a medição de vazão deve ser conhecido, de forma que correlações possam permitir a correção do valor medido para o valor real de vazão de gás natural. Em muitos casos, entretanto, nenhuma correção é realizada sobre a medição de vazão de gás natural determinada pelos medidores monofásicos, mesmo em condições de gás úmido. Para frações bem reduzidas de líquido, o acréscimo na incerteza pode ser aceitável; no entanto,

caso a fração de líquido presente no escoamento seja considerável, os erros gerados tendem a ser bastante elevados quando não se realiza a correção da vazão obtida pelos medidores monofásicos.

Tecnologias de medição monofásica que não utilizam o princípio de pressão diferencial ainda não apresentam desempenho satisfatório para a medição de vazão de gás em escoamento de gás úmido, necessitando de estudos e maiores desenvolvimentos. No caso dos medidores ultrassônicos, por exemplo, surgem problemas como a refração do sinal e a redução de sua potência devido à presença da fase líquida, que dificultam a aplicação dos medidores em aplicações de gás úmido. Portanto, as soluções geralmente encontradas se baseiam no princípio de pressão diferencial [34].

Quando o gás úmido escoar através de medidores de pressão diferencial, como venturi, v-cone ou placa de orifício, a tendência é sobrestimar a pressão diferencial em relação à mesma massa de gás seco, ou seja, a pressão diferencial é maior do que aquela que seria produzida caso a fase gasosa estivesse escoando sozinha na tubulação. Isso ocorre devido às perdas de energia nas interfaces entre gás e líquido, quando ocorre o escoamento através do medidor, além da perda adicional de energia devido à aceleração do líquido ao passar pela restrição. Ocorre, ainda, uma redução da área da linha devido à presença da fase líquida, causando um aumento na velocidade do gás e, conseqüentemente, na pressão diferencial.

Como a vazão é calculada por meio da equação da conservação da energia, sendo função da raiz quadrada da pressão diferencial gerada no elemento primário, a tendência, portanto, é sobrestimar a vazão de gás natural. No entanto, devido às variadas características construtivas, cada medidor reage de uma determinada maneira à presença de líquido, não havendo uma regra geral para determinar a sobrestimação na vazão de gás. Além disso, essa superestimação depende da forma como as fases estão distribuídas ao longo da linha (interação entre o gás e o líquido), ou seja, do padrão de escoamento gerado.

As normas existentes para determinação da vazão de gás nesses medidores de pressão diferencial não levam em consideração a fração de líquido presente no escoamento; portanto, as vazões de gás obtidas são sempre sobrestimadas.

Em um escoamento de gás úmido, para se obter uma medição de vazão de gás com reduzida incerteza, utilizando medidores monofásicos de pressão

diferencial, é necessário, então, efetuar correções de forma a compensar a presença de líquido no gás natural.

A equação básica para determinação da vazão mássica de gás, em qualquer medidor de pressão diferencial, assemelha-se à Eq. (12) [19]:

$$Q_m = C_d \cdot A_t \cdot Y \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_g \cdot \rho}{1 - \beta^4}} \quad (20)$$

Da Eq. (20), temos:

C_d – coeficiente de descarga;

β – relação entre o diâmetro equivalente da restrição e o diâmetro da tubulação;

A_t – área na restrição;

Y – fator de expansão do gás;

Δp_g – diferencial de pressão através do medidor;

ρ – massa específica do gás.

Em caso de medição de vazão de gás em condições de gás úmido, o diferencial de pressão medido através do medidor (Δp_{gu}) é, via de regra, maior do que aquele obtido em condições de gás seco (Δp_g). Logo, é necessário obter um fator de correção capaz de relacionar a queda de pressão na condição de gás úmido (valor medido) e a queda de pressão em condições de gás seco, permitindo encontrar a vazão real de gás natural para quaisquer condições operacionais e padrões de escoamento encontrados na indústria.

3.1.

Correlações para correção da vazão de gás natural

Como na maioria dos problemas relacionados à mecânica dos fluidos, a determinação da vazão de gás em escoamento de gás úmido, através de medidores de princípio de pressão diferencial, é dependente de relações complexas entre as características físicas e operacionais do sistema, e os parâmetros dos fluidos. De forma a analisar esses aspectos, foram realizadas diversas modelagens do escoamento, ajustadas por dados experimentais. Em geral, os modelos utilizam parâmetros adimensionais, como o parâmetro de Lockhart-Martinelli e o número de Froude.

A partir dos estudos realizados, algumas correlações foram então desenvolvidas para correção da medição de vazão de gás natural em

escoamento de gás úmido, em medidores do tipo pressão diferencial. Estas correlações visam a determinar um fator de correção para obtenção da vazão real de gás em escoamento na tubulação, considerando a superestimação causada pela presença de líquido. Elas são possíveis de serem aplicadas desde que o medidor apresente uma boa repetitividade em suas leituras, já que o erro sistemático apresentado pode ser minimizado por meio da aplicação dessas correlações.

O fator de correção (FC) é utilizado para corrigir a vazão de gás medida em um escoamento de gás úmido da seguinte forma:

$$Q_g = \frac{Q_{gu}}{FC} \quad (21)$$

Onde Q_{gu} representa a vazão de gás, em escoamento de gás úmido, obtida pelo medidor de pressão diferencial e Q_g representa a vazão real de gás natural corrigida.

Observa-se que, para a aplicação das correlações, é necessário conhecer, *a priori*, a fração volumétrica de líquido presente no escoamento ou a vazão volumétrica de líquido. Na operação real em campo, esta informação pode ser obtida, por exemplo, a partir de métodos que utilizam análise periódica do fluido em laboratório, injeção de traçadores, ou leitura de histórico em separadores de produção ou de teste [34]. Deve-se buscar a determinação adequada dessa fase líquida, de forma a minimizar as incertezas na determinação da vazão de gás. Além disso, as correlações geralmente foram geradas e são válidas para valores do parâmetro de Lockhart-Martinelli entre 0 e 0,3 [12].

As principais correlações desenvolvidas para correção da vazão de gás natural em escoamento de gás úmido, conforme a literatura disponível, são apresentadas a seguir. Pretende-se avaliar, neste trabalho, a aplicabilidade dessas correlações para o medidor v-cone, já que, em sua maioria, foram desenvolvidas para o venturi ou para a placa de orifício. Apenas uma correlação foi desenvolvida especialmente para o v-cone (correlação de Steven), mas essa correlação é recente e ainda requer maior estudo e avaliação em testes de laboratório ou de campo. É importante considerar que uma correlação adequada deve apresentar bons resultados nas diversas condições operacionais, independentemente do padrão de escoamento existente.

3.1.1. Correlações desenvolvidas para placa de orifício

A placa de orifício é um medidor que, assim como o v-cone, gera uma pressão diferencial proporcional ao quadrado da vazão. A placa de orifício clássica é concêntrica, de parede fina e aresta viva [35]. Suas dimensões são completamente definidas em normas nacionais e internacionais. A Fig. 8 ilustra um sistema de medição de vazão por placa de orifício, contendo os elementos primários, secundários e terciário [10].

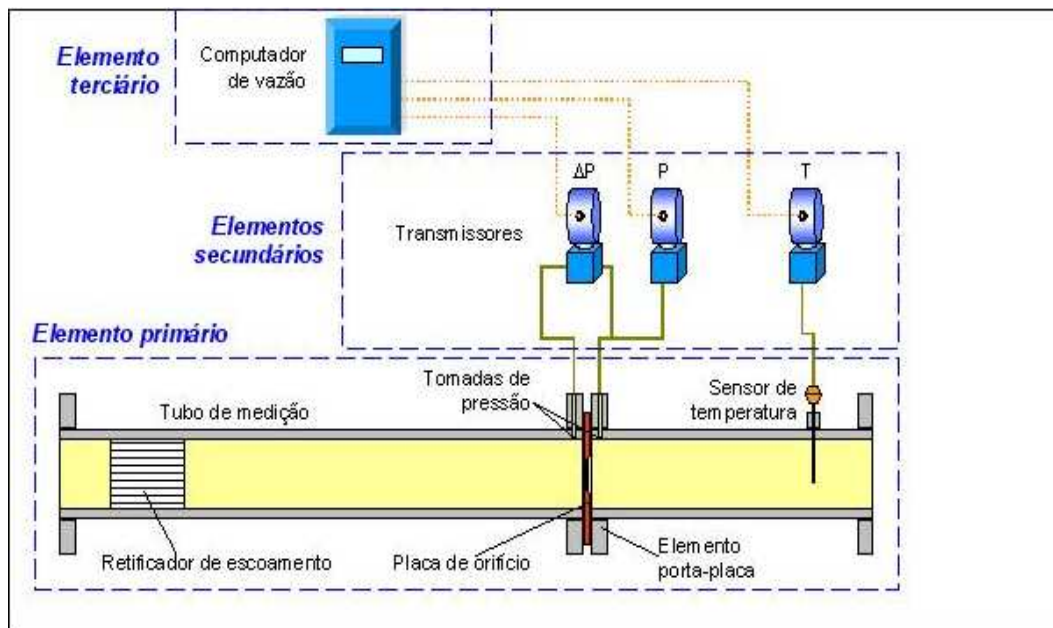


Figura 8 - Sistema de medição de vazão por placa de orifício

Tradicionalmente, a placa de orifício vem sendo utilizada para a medição de vazão de gás natural em escoamento de gás úmido. Em muitos casos, nenhuma correção é realizada sobre a medição de vazão de gás determinada pela placa, mesmo em condições de gás úmido. Nos últimos anos, essa aplicação tem sido evitada quando possível, já que o líquido tende a se acumular na placa, gerando um fluxo de golfadas. Isso resulta em uma leitura de pressão diferencial bastante instável. Além disso, a placa de orifício está sujeita a deformações, em casos de golfadas ou pulsos de pressão [17].

No caso de escoamento de gás úmido, as correlações mais utilizadas para a correção da medição de vazão de gás são as correlações de Murdock e Chisholm, apresentadas a seguir.

3.1.1.1. Correlação de Murdock

Em 1962, Murdock [36] publicou suas pesquisas sobre a resposta da placa de orifício em condições de escoamento bifásico, gerando a correlação de Murdock. Após os estudos realizados e o acúmulo de dados de diversas placas de orifício sob variadas condições operacionais, sugeriu que a sobrestimação causada pela presença de líquido era função do parâmetro de Lockhart-Martinelli. Murdock deduziu um fator de correção na medição da vazão do gás úmido, para um escoamento em linha horizontal, utilizando o denominado $X_{Murdock}$, que leva em consideração a fração de líquido carregada pelo gás e assume um fluxo estratificado. Este fator não considera o escorregamento entre a fase líquida e a fase gasosa, ou seja, a diferença de velocidades entre as fases no escoamento de gás úmido. Pode ser aproximado por uma equação equivalente à equação referente ao parâmetro de Lockhart-Martinelli:

$$X_{Murdock} = \sqrt{\frac{\Delta p_L}{\Delta p_g}} = \frac{M_L}{M_g} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_L}} = \frac{Q_L}{Q_g} \sqrt{\frac{\rho_L}{\rho_g}} \quad (22)$$

Da Eq. (22), temos:

Δp_L – pressão diferencial provocada pela vazão mássica de líquido;

Δp_g – pressão diferencial provocada pela vazão mássica de gás;

M_L – vazão mássica de líquido;

M_g – vazão mássica de gás;

Q_L = vazão volumétrica de líquido;

Q_g = vazão volumétrica de gás;

ρ_L – massa específica do líquido;

ρ_g – massa específica do gás;

$X_{Murdock}$ - relação entre a raiz quadrada da pressão diferencial provocada por uma determinada velocidade superficial de líquido e a pressão diferencial provocada por uma determinada velocidade superficial de gás, quando ambas as fases escoam sozinhas.

O fator de Murdock pode então ser aplicado na equação abaixo, que relaciona a pressão diferencial provocada pela vazão de gás úmido (Δp_{gu}) e a pressão diferencial provocada pela vazão de gás seco (Δp_g):

$$\sqrt{\frac{\Delta p_{gu}}{\Delta p_g}} = \sqrt{\frac{\Delta p_L}{\Delta p_g}} + 1 = X_{Murdock} + 1 \quad (23)$$

A Eq. (23) representa a correção da vazão de gás em condições ideais, ou seja, sem considerar o escorregamento entre as fases, a compressibilidade dos fluidos, as perdas por fricção e atrito, e a heterogeneidade do escoamento. Após a realização de experimentos, Murdock ajustou a equação teórica por um fator de 1,26:

$$\sqrt{\frac{\Delta p_{gu}}{\Delta p_g}} = 1,26 \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_L}{\Delta p_g}} + 1 = 1,26 \cdot X_{Murdock} + 1 \quad (24)$$

Logo, a correlação de Murdock para a correção da vazão de gás é:

$$Q_g = \frac{Q_{gu}}{1 + 1,26 \cdot X_{Murdock}} \quad (25)$$

Onde Q_{gu} representa a vazão volumétrica de gás, em escoamento de gás úmido, obtida por meio da equação do medidor de pressão diferencial (vazão de gás “aparente”) e Q_g representa a vazão volumétrica de gás corrigida.

3.1.1.2. Correlação de Chisholm

Entre os anos de 1967 e 1977, Chisholm publicou suas pesquisas sobre escoamento de gás úmido em placas de orifício, gerando a correlação de Chisholm. Além de considerar a fração de líquido carregada pelo gás, também leva em consideração a influência da pressão ou da razão entre as massas específicas de gás e líquido (número adimensional), na correção da vazão de gás. Apesar de, assim como Murdock, assumir o fluxo estratificado, Chisholm também incluiu os efeitos de escorregamento no seu modelo [37]. O fator de correção devido à sobrestimação da medição de vazão de gás, em escoamento de gás úmido, é dado pela seguinte equação [38]:

$$FC = \sqrt{1 + C \cdot X + X^2} \quad (26)$$

Dessa equação, temos:

$$C = \sqrt[4]{\frac{\rho_g}{\rho_L}} + \sqrt[4]{\frac{\rho_L}{\rho_g}} \quad (27)$$

Além disso, X representa o parâmetro de Lockhart-Martinelli conforme definido anteriormente. Logo, a correção da vazão de gás será dada por:

$$Q_g = \frac{Q_{gu}}{\sqrt{1 + C.X + X^2}} \quad (28)$$

3.1.2.

Correlações desenvolvidas para medidor venturi

O tubo venturi também é um medidor que gera uma pressão diferencial proporcional ao quadrado da vazão. É formado pelas seguintes partes:

- Uma parte cilíndrica, onde fica localizada a tomada de alta pressão;
- Um cone convergente;
- Uma garganta cilíndrica, onde fica localizada a tomada de baixa pressão;
- Um cone divergente.

A Fig. 9 ilustra o medidor venturi [39], com p representando a pressão e v representando a velocidade.

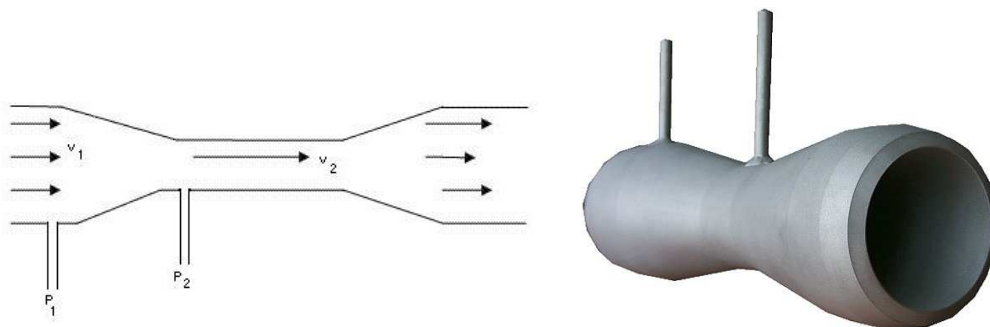


Figura 9 – Medidor venturi

Em aplicações de medição de vazão em escoamento de gás úmido, o medidor venturi tende a acumular líquido na sua entrada, gerando pequenas golfadas. Essas golfadas causam variações de pressão, levando a leituras instáveis do medidor de pressão diferencial. No entanto, é menos sensível do

que a placa de orifício à formação de golfadas e pulsos de pressão, pois a restrição ao escoamento não é tão abrupta como no caso da placa [17].

No caso do medidor venturi, as correlações mais recentes e adequadas, de acordo com a literatura, são as correlações de Leeuw e Steven [12]. Os dados experimentais mostraram que as correlações de Murdock e Chisholm, desenvolvidas para a placa de orifício, não prevêm adequadamente a correção da superestimação na vazão de gás, em condições de gás úmido, para um medidor do tipo venturi. Isso porque a correlação de Murdock não leva em consideração a pressão de processo nem o número de Froude (velocidade superficial do fluido), e a correlação de Chisholm não leva em consideração a dependência do número de Froude.

Os fatores de correção de Leeuw e Steven levam em consideração a pressão de processo, o parâmetro de Lockhart-Martinelli, e a velocidade superficial de gás ou o número de Froude de gás. Esses fatores estão apresentados a seguir.

3.1.2.1. Correlação de Leeuw

Em 1997, Leeuw apresentou seus estudos em medição de vazão de gás úmido utilizando o medidor venturi [40]. Leeuw mostrou que os efeitos da concentração de líquido (mostrados por Murdock) e os efeitos da pressão ou da razão entre as massas específicas de gás e líquido (mostrados por Chisholm) nos medidores do tipo placa de orifício também ocorriam para os medidores do tipo venturi. Além disso, Leeuw verificou que a velocidade superficial de gás, ou o número de Froude, também influenciava na magnitude da sobrestimação da vazão de gás.

A correlação gerada por Leeuw se assemelha à correlação de Chisholm para placa de orifício, mas o parâmetro C leva em consideração o número de Froude do gás. Leeuw descobriu que o expoente “ n ”, considerado constante por Chisholm para a placa de orifício, deveria ser constante apenas em fluxos estratificados (baixas vazões de gás ou baixas pressões), sendo função do número de Froude do gás à medida que o fluxo se aproxima das condições de fluxo anular-névoa.

A correlação de Leeuw foi levantada para pressões de 15 a 90 bar e considerando o parâmetro de Lockhart-Martinelli na faixa de 0 a 0,3. Os fluidos

utilizados nos testes foram nitrogênio e óleo diesel (testes em laboratório), e gás natural e água (testes em campo).

O fator de correção na superestimação da medição de vazão de gás, em escoamento de gás úmido, é dado pela seguinte equação:

$$FC = \sqrt{1 + C_{Leeuw} \cdot X + X^2} \quad (29)$$

Onde X é o parâmetro de Lockhart-Martinelli e C_{Leeuw} é dado pela seguinte equação:

$$C_{Leeuw} = \left(\frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^n + \left(\frac{\rho_L}{\rho_g} \right)^n \quad (30)$$

Na Eq. (30), o expoente n é função do número de Froude do gás. Para números de Froude inferiores a 1,5, n é constante e igual a 0,41; para números de Froude iguais ou maiores que 1,5, o ajuste do expoente n em função do número de Froude do gás é:

$$n = 0,606 \cdot (1 - e^{-0,746 \cdot Fr}) \quad (31)$$

Temos, então, que a correção da vazão de gás é dada por:

$$Q_g = \frac{Q_{gu}}{\sqrt{1 + C_{Leeuw} \cdot X + X^2}} \quad (32)$$

A correlação de Leeuw foi gerada com gases de massa específica maior que 17 kg/m^3 e parâmetro de Lockhart-Martinelli menor ou igual a 0,3; portanto, a correlação é válida, a princípio, nestas condições.

3.1.2.2. Correlação de Steven

A correlação empírica de Steven foi elaborada a partir de testes realizados no circuito de testes de gás úmido do laboratório *National Engineering Laboratory* (NEL), na Escócia, com um medidor do tipo venturi de 6 polegadas (6"). Os testes foram realizados em pressões de até 60 bar e vazões de gás de até $1\,000 \text{ m}^3/\text{h}$. Essa correlação foi proposta por Steven em 2001, buscando reduzir as incertezas na determinação de vazão de gás natural em medidores do tipo venturi, para um escoamento de gás úmido.

O fator de correção para a sobrestimação da vazão de gás natural, em escoamento de gás úmido, também leva em consideração a pressão de operação, expressa pela relação entre as massas específicas de gás e líquido, a fração de líquido presente na corrente de gás, expressa pelo parâmetro de Lockhart-Martinelli, e a vazão de gás, expressa pelo número de Froude de gás. Pode ser representado pela seguinte equação [41]:

$$FC = \left(\frac{1 + A.X + B.Fr}{1 + C.X + D.Fr} \right) \quad (33)$$

Onde X representa o parâmetro de Lockhart-Martinelli e Fr representa o número de Froude. A , B , C e D são constantes determinadas de acordo com as seguintes equações:

$$A = 2,085 + \left(\frac{0,0060}{\left(\frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^2} \right) \quad (34)$$

$$B = -0,08 + \left(\frac{0,0001}{\left(\frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^2} \right) \quad (35)$$

$$C = 0,548 + \left(\frac{0,0042}{\left(\frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^2} \right) \quad (36)$$

$$D = -0,079 + \left(\frac{0,00009}{\left(\frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^2} \right) \quad (37)$$

Logo, a vazão de gás corrigida é dada por:

$$Q_g = \frac{Q_{gu}}{\left(\frac{1 + A.X + B.Fr}{1 + C.X + D.Fr} \right)} \quad (38)$$

3.1.3. Correlação desenvolvida para v-cone

Em aplicações de gás úmido, diferentemente da placa de orifício e do venturi, o v-cone tende a condicionar o escoamento à medida que este passa pelo cone. Como não há uma seção convergente, não existe a tendência de o líquido se acumular na entrada do medidor, o que evita a formação de golfadas e pulsos de pressão e permite a geração de leituras mais estáveis de pressão diferencial. Este fato credencia o v-cone como uma alternativa interessante a ser avaliada para medição de vazão de gás em condições de gás úmido.

Especificamente para o v-cone, foi desenvolvida recentemente uma correlação que visa a corrigir a vazão de gás em escoamento de gás úmido. Essa correlação é apresentada a seguir.

3.1.3.1. Nova correlação de Steven

A correlação de Steven foi desenvolvida a partir de testes realizados com v-cone de 6 polegadas (6"), no laboratório *National Engineering Laboratory* (NEL), nos anos de 2001 e 2003. Foram utilizados medidores com valores de beta iguais a 0,55 e 0,75. Nos testes realizados, foi verificado que os erros nas leituras de vazão de gás do v-cone podem ser dependentes do parâmetro de Lockhart-Martinelli, da pressão de operação e do número de Froude. O fator de correção da vazão de gás, conforme Steven [42], pode então ser obtido por meio da seguinte equação:

$$FC = \left(\frac{1 + A.X + B.Fr}{1 + C.X + B.Fr} \right) \quad (39)$$

Onde X é o parâmetro de Lockhart-Martinelli e Fr representa o número de Froude. Os coeficientes A , B e C foram determinados para os dois valores de beta testados.

Portanto, a vazão volumétrica de gás corrigida é dada por:

$$Q_g = \frac{Q_{gu}}{\left(\frac{1 + A.X + B.Fr}{1 + C.X + B.Fr} \right)} \quad (40)$$

Para v-cone de beta = 0,55, foram realizados experimentos que levaram à geração dos seguintes coeficientes:

$$A = 1,224 + 0,141 \cdot \left[\frac{1}{\left(\frac{\rho_g}{\rho_L} \right)} \right] \quad (41)$$

$$B = -0,0334 - 0,00139 \cdot \left[\frac{1}{\left(\frac{\rho_g}{\rho_L} \right)} \right] \quad (42)$$

$$C = \sqrt{0,0805 + 0,0109 \cdot \left[\frac{1}{\left(\frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^2} \right]} \quad (43)$$

Para beta = 0,75, foram realizados experimentos que levaram à geração dos seguintes coeficientes:

$$A' = -0,0013 + 0,3997 \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\rho_g}{\rho_L} \right)}} \right] \quad (44)$$

$$B' = 0,0420 - 0,0317 \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\rho_g}{\rho_L} \right)}} \right] \quad (45)$$

$$C' = -0,7157 + 0,2819 \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\rho_g}{\rho_L} \right)}} \right] \quad (46)$$

3.2. Circuito de testes para avaliação do v-cone

Atualmente, a quantidade de laboratórios no mundo para testes de medidores de vazão em condições de gás úmido é bastante reduzida. Como exemplo, pode-se citar o laboratório *National Engineering Laboratory* (NEL), pertencente à companhia de prestação de serviços e consultoria TUV NEL, localizado na Escócia, e o laboratório *K-Lab*, pertencente à empresa produtora de petróleo e gás Statoil, localizado na Noruega. No Brasil, não há bancada de testes disponível para avaliação de medidores de vazão em escoamento de gás úmido. De forma a analisar o desempenho do medidor v-cone em escoamento de gás úmido e avaliar a aplicabilidade das correlações desenvolvidas para os medidores de pressão diferencial, foram realizados testes de um medidor v-cone de 6 polegadas (6") no laboratório *National Engineering Laboratory* (NEL). Estes testes foram feitos sob encomenda da Petrobras, no ano de 2008.

O circuito de testes de gás úmido do NEL está em operação desde 2005, sendo utilizado desde então para pesquisas, testes e calibrações de medidores de vazão. O circuito se constitui de um *loop* onde há recirculação dos fluidos em torno de um separador bifásico (gás e líquido) de 12 m³. Normalmente, a seção de teste possui 4 ou 6 polegadas, mas podendo ainda variar de 2 a 8 polegadas dependendo da aplicação. Os fluidos utilizados nos testes são nitrogênio e querosene, escolhidos para simular o mais próximo possível um sistema de gás natural e condensado, considerando ainda aspectos de custo e segurança envolvidos. A 20 °C, a fase líquida possui uma massa específica aproximada de 804 kg/m³ e uma viscosidade de 2,13 cP. O circuito opera em temperaturas ambientes de aproximadamente 20 °C e permite pressões de operação variáveis, com um valor mínimo de 15 bar e um valor máximo de 62 bar de pressão manométrica. Nesta faixa de pressão, a massa específica do gás varia entre 19 e 75 kg/m³, aproximadamente.

O gás natural, após ser liberado no topo do separador bifásico, percorre o *loop* em uma vazão de gás seco máxima de 1 500 m³/h, a partir de um

compressor de 200 kW. O líquido é injetado na seção de testes por meio de uma bomba centrífuga de 130 kW e um *spool* de injeção, em vazões de até 90 m³/h. As duas fases são medidas de forma monofásica antes de se misturarem no ponto de injeção. Após a mistura, passam, então, pela seção de testes, com trechos horizontais de até 15 metros. As temperaturas do gás e do líquido são controladas com trocadores de calor, de forma a manter temperaturas semelhantes na seção de testes. As frações volumétricas de líquido podem chegar a até 10%, aproximadamente, dependendo das condições operacionais de teste. O escoamento bifásico, após passar pela seção de testes, retorna ao separador, reiniciando o processo. As vazões de gás são controladas a partir da variação da velocidade do compressor, enquanto as vazões de líquido são controladas por meio de uma válvula de controle.

A vazão de referência de gás é medida a partir de um medidor ultrassônico de 6 polegadas (6"), do fabricante Daniel. A vazão de referência de líquido é obtida por meio de medidores do tipo turbina, fabricante Emo, podendo ser utilizadas turbinas de 1 ou 3 polegadas. Os medidores são periodicamente calibrados, com rastreabilidade aos padrões internacionais. Dependendo das vazões consideradas, pode ser utilizada mais de uma linha em paralelo para a medição. A incerteza expandida da medição de vazão volumétrica de gás é de $\pm 0,5\%$, na faixa de vazões obtida no circuito de testes. A incerteza expandida da medição de vazão volumétrica de líquido é de $\pm 0,2\%$, na faixa de vazões obtida no circuito de testes. Esses valores de incerteza são considerados para um nível de confiança de aproximadamente 95%.

As medições de temperatura e pressão, associadas a cada medidor de vazão, também são realizadas por instrumentos calibrados, com rastreabilidade aos padrões internacionais. Estas medições podem ser utilizadas, por exemplo, para determinação da massa específica do gás e para o cálculo das vazões volumétricas nas condições padrão (20 °C e 101,325 kPa abs).

Na seção de testes, também há as medições de temperatura e pressão, realizadas por instrumentos calibrados, com rastreabilidade aos padrões internacionais. Além disso, três medidores de pressão diferencial calibrados são utilizados no v-cone em *split range*, ou seja, utilizando três diferentes faixas de medição calibradas. Dessa forma, pode-se obter a variável com uma maior faixa de medição e menor incerteza.

Nos testes realizados, foram utilizados trechos retos de 6 polegadas (6") com comprimento de 40 diâmetros (40D) a montante e 5 diâmetros (5D) a jusante do medidor v-cone.

A Fig. 10 apresenta um desenho esquemático do laboratório NEL, com um esboço geral e indicação de seus principais equipamentos.

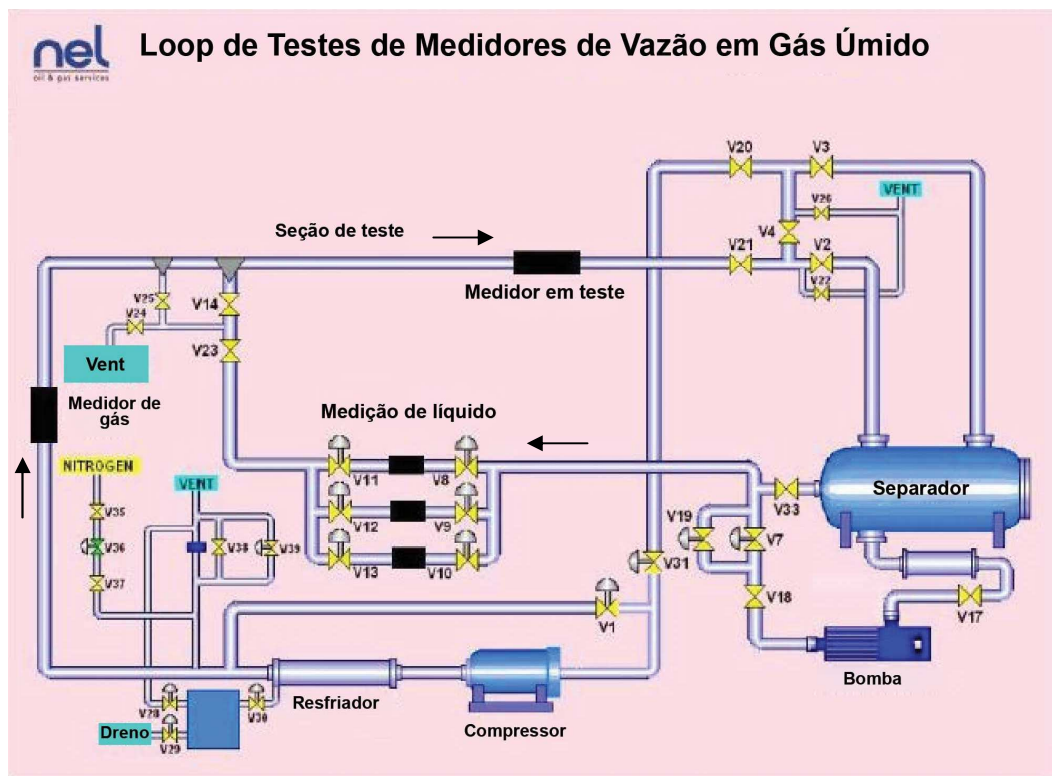


Figura 10 - Representação esquemática do circuito de testes do laboratório NEL

3.3. Apresentação dos resultados dos testes

A avaliação do desempenho do v-cone em medição de vazão de gás em escoamento de gás úmido foi feita a partir da análise dos resultados dos testes realizados no laboratório NEL em variadas condições operacionais (vazões de líquido e gás, pressões, frações de líquido, etc). Basicamente, a avaliação foi realizada de acordo com as seguintes etapas:

- Obtenção dos dados de teste no NEL (tais como pressão, temperatura, pressão diferencial, massa específica, etc, nos medidores de referência e no v-cone), com o cálculo das vazões e dos valores de erro (sobrestimação) nas medições do v-cone, de acordo com as equações apresentadas no capítulo 2.
- Análise dos parâmetros que influenciam na sobrestimação da medição de vazão de gás do medidor v-cone, a partir dos dados obtidos e processados.

- Avaliação das principais correlações geradas e disponíveis na literatura para a correção de medição de vazão de gás em escoamento de gás úmido, para medidores de pressão diferencial, e sua aplicabilidade para o medidor v-cone. Essas correlações foram apresentadas no item 3.1.

Os resultados dos testes realizados com o v-cone foram avaliados com a utilização de gráficos que evidenciam os erros na medição de vazão de gás do v-cone em comparação com a vazão de referência. Essa comparação entre as vazões pode ser feita em base volumétrica ou mássica. Neste caso, foi adotada a avaliação das vazões em base volumétrica.

Foram obtidos os erros antes e após a aplicação das correlações, em diversas condições operacionais, para apresentação em forma de gráficos. A Fig. 11 ilustra um gráfico de erro em função do parâmetro de Lockhart-Martinelli, onde o erro pode ser expresso pela razão entre a vazão medida do v-cone e a vazão de gás de referência, ou pela razão entre a vazão corrigida do v-cone e a vazão de gás de referência. Neste exemplo, o erro representa a razão entre a vazão medida do v-cone e a vazão de gás de referência.

Portanto, um valor igual a 1 indica que a vazão medida ou corrigida do v-cone coincide com a vazão de gás de referência (não há erro). O afastamento de 1 indica um aumento no erro da vazão de gás medida ou corrigida. Portanto, o erro na medição da vazão é um número adimensional expresso por:

$$Erro = \frac{Q_{med}}{Q_{ref}} \text{ ou } \frac{Q_{cor}}{Q_{ref}} \quad (47)$$

onde Q_{med} representa a vazão de gás medida pelo v-cone, ou seja, vazão de gás “aparente” registrada pelo v-cone. Q_{cor} representa a vazão de gás corrigida por meio da correlação e Q_{ref} representa a vazão de gás de referência fornecida pelo medidor ultrassônico.

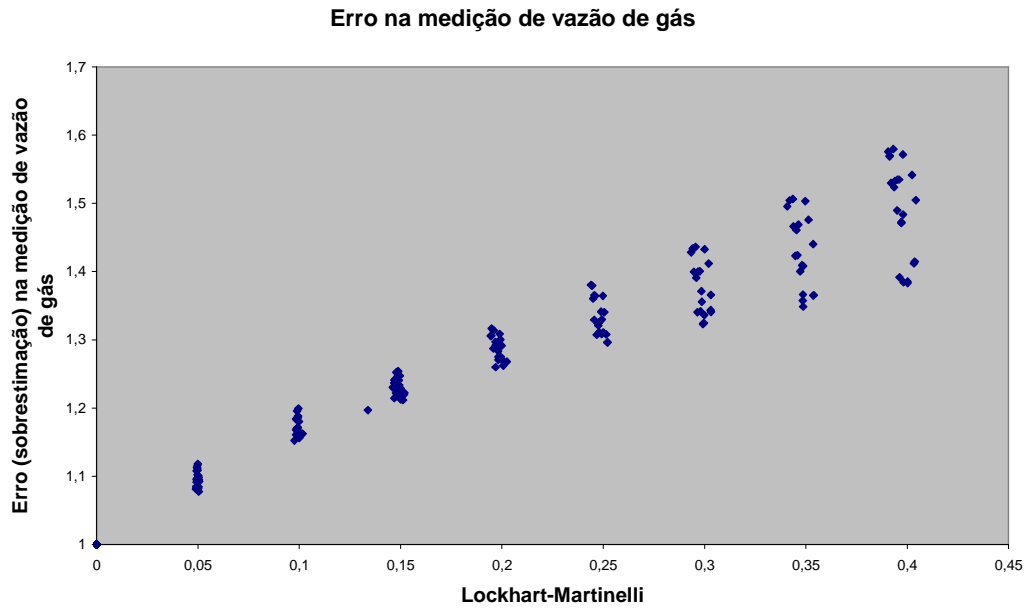


Figura 11 – Exemplo de gráfico apresentando os erros na medição de vazão de gás do v-cone

Também foram obtidos os erros percentuais residuais após a aplicação de uma determinada correlação, para apresentação em forma de gráficos. A Fig. 12 ilustra um gráfico de erro percentual residual, em função do parâmetro de Lockhart-Martinelli. Neste caso em particular, há ainda uma diferenciação dos pontos de acordo com a pressão de teste. O erro percentual residual é calculado por:

$$Erro (\%) = \left(\frac{Q_{cor} - Q_{ref}}{Q_{ref}} \right) * 100 \quad (48)$$

Nesta equação, Q_{cor} representa a vazão de gás corrigida pela correlação (vazão de gás do v-cone corrigida) e Q_{ref} representa a vazão de gás de referência.

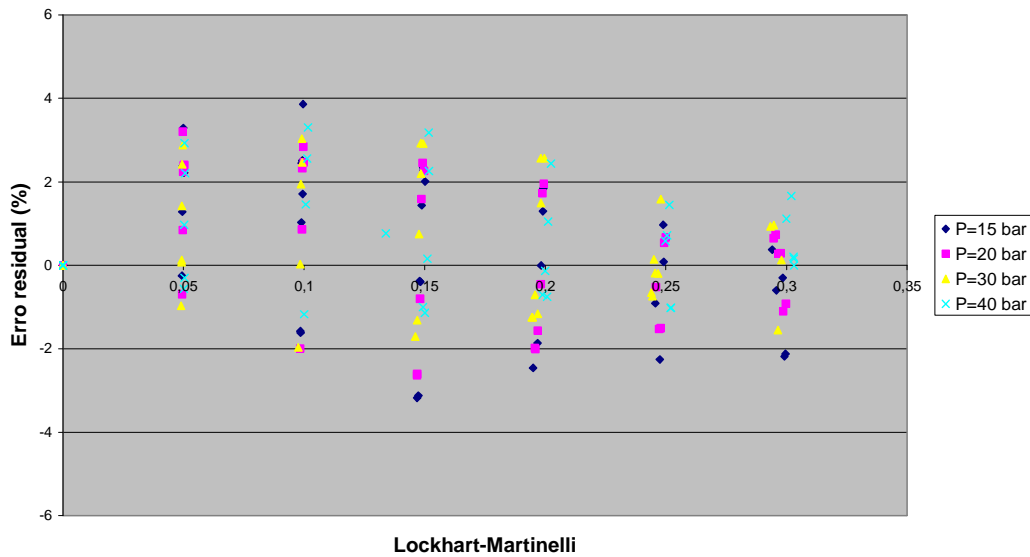


Figura 12 – Exemplo de gráfico apresentando o erro residual percentual na medição de vazão de gás do v-cone, após aplicação de determinada correlação

Após a discussão dos resultados apresentados nos gráficos, foram determinados os erros máximos encontrados das vazões de gás obtidas pelo medidor v-cone com relação às vazões de referência, para cada pressão de teste, após a aplicação da correlação mais adequada de correção da vazão. Além disso, foi realizada a avaliação das incertezas de medição, considerando duas metodologias de análise propostas: metodologia 1, que é baseada na análise da dispersão dos dados encontrados (dispersão dos erros) e do erro sistemático residual médio; e a metodologia 2, que permite uma avaliação a partir da comparação direta (gráfico) entre a vazão de gás de referência e a vazão de gás medida pelo v-cone e corrigida por meio da correlação, utilizando um ajuste de polinômio pelo método dos mínimos quadrados.

Da mesma forma, também foram discutidos os resultados incluindo os testes realizados com altas frações de líquido na corrente de gás (parâmetro de Lockhart-Martinelli superior a 0,3).

As análises efetuadas permitiram discutir se as correlações para correção das vazões de gás do medidor v-cone estão adequadas e se o desempenho do medidor pode ser considerado satisfatório para aplicações de medição de vazão de gás em escoamento de gás úmido.